

La stabilité des formes fluviales de l'Orange, entre variabilité naturelle et impacts des grands barrages (secteur Boegoeberg-Augrabies, Afrique du Sud)

The stability of fluvial forms in the Orange River, between natural variability and impacts of great dams (Boegoeberg-Augrabies sector, South Africa)

David Blanchon et Jean-Paul Bravard

Volume 61, numéro 1, 2007

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/029568ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/029568ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Blanchon, D. & Bravard, J.-P. (2007). La stabilité des formes fluviales de l'Orange, entre variabilité naturelle et impacts des grands barrages (secteur Boegoeberg-Augrabies, Afrique du Sud). *Géographie physique et Quaternaire*, 61(1), 21–37. <https://doi.org/10.7202/029568ar>

Résumé de l'article

Le fleuve Orange (Afrique du Sud) est l'un des systèmes fluviaux les plus aménagés au monde : les barrages hydroélectriques ont modifié le volume d'écoulement du fleuve et son débit solide a diminué depuis les années 1930. Plus encore, dans son cours moyen inférieur (secteur d'Upington), le fleuve a été contraint entre des digues de 5 à 10 m de hauteur, des chenaux secondaires ont été remplis pour permettre le développement agricole et plus de 10 déversoirs de bas niveau ont été construits à travers le chenal. Dans des conditions similaires, des changements géomorphologiques visibles et rapides (incision du chenal, alluvionnement, etc.) ont été enregistrés dans divers systèmes fluviaux en région semi-aride. Pourtant, l'étude de cartes anciennes (des années 1920) et de photographies aériennes (à partir de 1937) montre une stabilité remarquable des formes fluviales, et ce, même à petite échelle : des bancs sableux et des seuils rocheux sont facilement reconnaissables dans le chenal principal. L'objectif de cet article est d'explorer les différentes hypothèses expliquant cette stabilité, en utilisant le concept de discontinuité et la théorie de la catastrophe, et de confronter les résultats avec les travaux récents sur le fleuve Orange. Notre recherche est basée sur le calcul des puissances spécifiques des crues vicennales, la reconnaissance de terrain (entre 2000 et 2003) et le prélèvement de sédiments, en utilisant la méthode de la courbe de Passega. Nous avons également effectué des comparaisons entre les photographies aériennes et les cartes anciennes et les photographies aériennes les plus récentes à l'aide des outils SIG (MapInfo). À micro-échelle, la progression et la destruction des roseaux (*Phragmites australis* et *Arundo donax*) a été utilisée comme indicateur des changements géomorphologiques du chenal. Les résultats montrent que les concepts de stabilité et d'équilibre, et les changements géomorphologiques fluviaux sont plus complexes qu'une simple comparaison statique.

LA STABILITÉ DES FORMES FLUVIALES DE L'ORANGE, ENTRE VARIABILITÉ NATURELLE ET IMPACTS DES GRANDS BARRAGES (SECTEUR BOEGOEBERG-AUGRABIES, AFRIQUE DU SUD)

David BLANCHON et Jean-Paul BRAVARD* ; premier auteur : Laboratoire Aménagement, Développement, Environnement et Sociétés — Dynamique des Milieux et des Sociétés dans les Espaces Tropicaux (ADES-DYMSET), UMR 5185 CNRS, Université Michel de Montaigne Bordeaux III, Maison des Suds, 12 Esplanade des Antilles, B.P. 200, 33607 Pessac Cedex, France ; deuxième auteur : Institut universitaire de France, UMR 5600 CNRS, Université Lumière Lyon II, 5 avenue Pierre Mendès-France, 69767 Bron Cedex, France.

RÉSUMÉ Le fleuve Orange (Afrique du Sud) est l'un des systèmes fluviaux les plus aménagés au monde : les barrages hydroélectriques ont modifié le volume d'écoulement du fleuve et son débit solide a diminué depuis les années 1930. Plus encore, dans son cours moyen inférieur (secteur d'Upington), le fleuve a été contraint entre des digues de 5 à 10 m de hauteur, des chenaux secondaires ont été remplis pour permettre le développement agricole et plus de 10 déversoirs de bas niveau ont été construits à travers le chenal. Dans des conditions similaires, des changements géomorphologiques visibles et rapides (incision du chenal, alluvionnement, etc.) ont été enregistrés dans divers systèmes fluviaux en région semi-aride. Pourtant, l'étude de cartes anciennes (des années 1920) et de photographies aériennes (à partir de 1937) montre une stabilité remarquable des formes fluviales, et ce, même à petite échelle : des bancs sableux et des seuils rocheux sont facilement reconnaissables dans le chenal principal. L'objectif de cet article est d'explorer les différentes hypothèses expliquant cette stabilité, en utilisant le concept de discontinuité et la théorie de la catastrophe, et de confronter les résultats avec les travaux récents sur le fleuve Orange. Notre recherche est basée sur le calcul des puissances spécifiques des crues vicennales, la reconnaissance de terrain (entre 2000 et 2003) et le prélèvement de sédiments, en utilisant la méthode de la courbe de Passega. Nous avons également effectué des comparaisons entre les photographies aériennes et les cartes anciennes et les photographies aériennes les plus récentes à l'aide des outils SIG (MapInfo). À micro-échelle, la progression et la destruction des roseaux (*Phragmites australis* et *Arundo donax*) a été utilisée comme indicateur des changements géomorphologiques du chenal. Les résultats montrent que les concepts de stabilité et d'équilibre, et les changements géomorphologiques fluviaux sont plus complexes qu'une simple comparaison statique.

ABSTRACT *The stability of fluvial forms in the Orange River, between natural variability and impacts of great dams (Boegoeberg-Augrabies sector, South Africa).* The Orange River (South Africa) is one of the most manipulated water system in the world : power dams have modified the flow volume of the river, and the sediment load has been decreasing since the 1930s. Moreover, in the lower middle reaches of the river (Upington region), the river has been constrained between 5 to 10 m high levees, secondary channels have been filled for agricultural development, and more than 10 low level weirs have been built across the channel. In comparable conditions, visible and rapid geomorphological changes (channel incision, aggradation, etc.) have been monitored in various water systems in semi-arid regions. Yet, the comparison between old maps (from the 1920s) and aerial photographs (from 1937 onwards) shows a remarkable stability of fluvial patterns, even at a small scale : sandy banks and rocky outcrops are easily recognizable in the main channel. The aim of this paper is to explore several hypotheses about this stability, using the *Serial Discontinuity Concept* and the *Catastrophe Theory*, and confronting the results with recent works on the Orange River. Our research is based on unit stream power calculation for 20-year return floods, field recognition (from 2000 to 2003) and sediment sampling, sorted using the Passega curve methodology. We also made comparisons between old maps and aerial photographs and the most recent aerial photographs using GIS tools (MapInfo). At the micro-scale level, the progression and the destruction of reeds (*Phragmites australis* and *Arundo donax*) has been used as an indicator of geomorphological changes in the river channel. The results show that the notion of stability and equilibrium, and fluvial morphological changes are much more complex than the one given by a simple static comparison.

INTRODUCTION

Les rivières à lit rocheux font l'objet de travaux scientifiques renouvelés depuis quelques années (Baker et Kochel, 1988 ; Tinkler et Whol, 1998 ; Whol, 1998). On constate aussi que les grands cours d'eau subtropicaux sont encore peu étudiés, en particulier ceux qui ont entaillé leur lit dans un substratum de roche dure et qui transportent une charge sableuse. En Afrique occidentale et équatoriale, les travaux pionniers de Tricart (1956) sur les formes fluviales caractéristiques des cours d'eau sur socle n'ont pas été réellement repris, de sorte que les travaux portant sur les cours d'eau dont la morphologie est entièrement ou partiellement contrôlée par le substratum rocheux sont rares. C'est aussi le cas des grands systèmes fluviaux de l'hémisphère austral, en particulier l'Orange en Afrique du Sud, sur lesquels les chercheurs disposent de peu de données quantitatives. Les travaux récents de Zawada (1997) sur les paléodépôts fluviaux de ce bassin-versant, puis de Tooth et MacCarthy (2004) sur les conditions d'*anabranching* de l'Orange sont d'autant plus originaux. Ces derniers auteurs ont montré le caractère mixte de l'*anabranching* entre Upington et Augrabies, un style fluvial qui associe des chenaux multiples et des îles ; ces dernières sont entaillées dans le substratum métamorphique et partiellement formées d'alluvions sableuses dont le dépôt serait favorisé par la rugosité créée par la végétation et la variabilité du régime hydrologique. Enfin, une modélisation théorique a été récemment réalisée sur les marmites d'érosion de trois secteurs rocheux du lit de l'Orange pour étudier leur rôle dans le retrait des *knick points* (Springer *et al.*, 2006).

Mais ces descriptions de la morphologie fluviale de l'Orange ne prennent pas en compte un fait majeur : la construction de grands aménagements hydrauliques dans le cours supérieur du fleuve (notamment les grands barrages de Katse au Lesotho, Gariep et Vanderkloof en Afrique du Sud) et la mise en culture d'une grande partie du lit majeur du fleuve lorsque cela était possible. La présente étude analyse la dynamique du dessin en plan d'un tronçon de l'Orange d'une longueur de 289 km, compris entre Boegoeberg et Augrabies, avec l'hypothèse que les aménagements hydrauliques qui ont été réalisés depuis la fin du 19^e siècle pour les aménagements locaux et les années 1960 pour la grande hydraulique, en perturbant le fonctionnement hydrologique, ont pu être responsables d'un ajustement des formes fluviales sous le contrôle de la dynamique de dépôt et d'érosion. La réponse habituelle des systèmes fluviaux soumis à l'impact de barrages est une réduction de la charge solide qui se répercute à plus ou moins long terme sur la morphologie du chenal fluvial (Petts, 1984) ; on peut alors s'attendre, en théorie, à une évacuation des sédiments fins et à l'exhumation des formes rocheuses du lit mineur.

L'ORANGE, UN SYSTÈME FLUVIAL FORTEMENT PERTURBÉ

Le débit naturel des rivières sud-africaines est réputé pour son imprévisibilité prévisible (*predictable unpredictability*), selon l'expression de Davis (1979). Ceci semble être également valable pour la dynamique fluviale et sa réponse aux aménagements, qu'ils soient locaux ou à grande échelle. Ces rivières sont encore peu connues et, comme l'écrit Jolly (1996 : p. 578), « c'est un sujet de débat de savoir si les effets de la régulation du régime sont plus importants pour les rivières en climat aride et semi-aride que dans les régions tempérées ». Walker (1992) a démontré que c'est dans les zones semi-arides que l'on trouve les plus grandes disparités entre les régimes naturels et régulés. Mais d'autres auteurs, comme Poff et Ward (1992), soutiennent au contraire que les effets des grands ouvrages de régulation sont comparativement mineurs pour ces rivières, du fait que, dans ces zones, les écosystèmes ont une capacité exceptionnelle à absorber les effets des changements.

Malgré la taille de son bassin-versant, l'Orange est un fleuve relativement modeste. Il draine près d'un million de kilomètres carrés en Afrique australe et son débit annuel moyen estimé à l'embouchure est compris, selon les estimations, entre 6,4 et 15 km³ (Basson, 1999 ; UNEP, 1995), ce qui souligne sa très forte variabilité interannuelle largement due à l'occurrence ou à la non occurrence des grandes crues.

Après sa sortie des hautes montagnes du Lesotho, qui lui fournissent l'essentiel de ses eaux, l'Orange présente les trois principales caractéristiques des rivières arides, décrites par Graf (1998). La première étant une variabilité saisonnière et interannuelle marquée des débits, corollaire de la dépendance à l'égard de l'amont. Pendant la saison sèche, de mai à septembre, le débit moyen mensuel naturel¹ de l'Orange ne dépasse pas 200 m³/s alors qu'il dépasse 690 m³/s en février et mars. Ces hautes eaux, dont le débit maximal excède rarement 2 000 m³/s, sont faibles en comparaison aux grandes crues catastrophiques qui ravagent la vallée tous les dix à quinze ans (tabl. I). La dernière, survenue en 1988, a atteint un débit de pointe de 8 200 m³/s à Upington². La seconde étant la déconnexion entre le fonctionnement du fleuve et celui de ses affluents, dont le débit est encore plus irrégulier. Et enfin, l'emboîtement de deux styles fluviaux différents, l'un étant représentatif de longues périodes de faible débit, l'autre, des réajustements provoqués par les fortes crues.

La dynamique hydrologique de l'Orange a été fortement perturbée par la mise en service des grands barrages de Vanderkloof et Gariep sur le cours moyen du fleuve (fig. 1). Ces deux barrages, d'une capacité totale annuelle de 3,5 km³ d'eau, ne sont qu'une partie d'un système de huit transferts d'eau majeurs. Ce système s'articule autour de sept grands barrages qui stockent actuellement 19 km³ d'eau, soit près de

1. Avant la construction des grands barrages.

2. Ce débit est toujours atteint ou dépassé lors des crues qui ravagent tout le lit mineur, comme celles survenues en 1925, 1934, 1944, 1956, 1967, 1974 et 1976. Zawada (1997), en étudiant les dépôts de laisse de crue, a retrouvé la trace de 13 crues comprises entre 10 200 et 14 660 m³/s depuis 5500 ans. Ses observations ne suggèrent pas un changement hydrologique majeur et sont cohérentes avec les données mesurées.

TABLEAU I
Débits caractéristiques à Upington selon différentes sources
(en m³/s)

Débits	Kovacs, 1987	DWAF, 1992 ¹	DWAF, 1992 ²	DWAF, 1992 ³
Q ₂ ans		2 250	2 200	2 200
Q ₅ ans		3 800		
Q ₁₀ ans	4 800	6 000	6 100	5 800
Q ₂₀ ans		7 700	7 900	7 500
Q ₅₀ ans	10 800	10 100	10 600	9 900

DWAF : *Department of Water Affairs and Forestry*.

1. À partir de valeurs mesurées.

2. À partir de valeurs mesurées et des débits historiques.

3. À partir de valeurs mesurées et des paléocrues.

deux fois le volume annuel. Quatre-vingt pourcent de cette capacité de stockage, soit 16 km³, a été construite après 1970.

En raison de l'ampleur des aménagements et de l'importance de la charge alluviale, notre premier travail a consisté à repérer les modifications de la topographie fluviale depuis les années 1930. C'est pourquoi nous avons tout d'abord recensé les principaux impacts pouvant affecter la morphologie de l'Orange dans la région d'Upington (tabl. II).

La figure 2 montre l'altération des débits liquides mesurés à Upington, à plus de 800 km en aval des grands barrages, ce qui souligne d'ailleurs la dépendance par rapport à l'amont de cette région. Ces modifications se combinent aussi aux effets des aménagements locaux, dont les principaux impacts sont résumés dans le tableau III.

À partir de la fin du 19^e siècle, dans la région d'Upington, l'ensemble du macro-chenal a été progressivement colonisé : le chenal principal a été généralement endigué, les chenaux secondaires comblés et le plancher alluvial a été aplani pour permettre la mise en culture. De nombreux seuils secondaires ont aussi été construits en travers du chenal principal pour installer les prises d'eau des différents canaux d'irrigation. Les photographies aériennes diachroniques de l'île de Renosterkop, à 20 km en amont d'Augrabies, sont une bonne illustration de la technique de mise en valeur de cette région (fig. 3). Ce type de paysage, où il ne reste plus au fleuve qu'un chenal enserré entre de hautes digues (5 à 7 m de hauteur) et envahi aujourd'hui par les roseaux, est très largement dominant entre Boegoeberg et Augrabies, sauf là où la pente est trop forte.

MÉTHODOLOGIE

Dans des conditions comparables, des changements géomorphologiques majeurs et rapides, comme l'incision ou l'alluvionnement des chenaux, ont été constatés dans tous les

systèmes fluviaux des régions semi-arides étudiés. Ainsi, le cours moyen du Rio Grande, aux États-Unis, a connu des phénomènes significatifs d'incision 10 ans seulement après la construction de grands barrages dans les années 1950 et 1960 (Lagasse, 1994). Dans un contexte climatiquement semblable mais très différent morphologiquement, Thoms et Walker (1991) ont également décrit des changements importants de la géomorphologie fluviale du cours inférieur de la Murray, en Australie, après la construction de petits ouvrages de dérivation semblables à ceux présents dans la région d'Upington.

L'étude de l'Orange dans le secteur d'Upington se présentait donc comme un cas particulièrement adapté pour étudier les relations encore peu connues entre les aménagements hydrauliques et la morphologie fluviale dans les grands systèmes fluviaux allogènes en zone semi-aride. Dans cette zone peu étudiée, nous avons utilisé principalement deux méthodes d'enquête.

La première méthode d'enquête a été la comparaison de photographies aériennes diachroniques (séries de 1937, 1941, 1963, 1974, 1977, 1994 et 2002). Nous avons pu, après avoir géoréférencé les photographies aériennes avec le logiciel MapInfo, calculer la largeur du macro-chenal et la superficie de divers éléments significatifs (bancs attachés, bancs mobiles, roselières, etc.). Dans certains cas, comme au lieu-dit Majestriver, nous disposons également de cartes anciennes provenant des archives de la section locale d'Upington du *Department of Water Affairs and Forestry* (DWAF), que nous avons pu numériser et superposer aux photographies aériennes récentes.

Pour la seconde méthode d'enquête, nous avons effectué des prélèvements de sédiments dans des secteurs sélectionnés. Ceux-ci devaient répondre à deux caractéristiques : présenter des bancs alluviaux suffisamment étendus où les formes fluviales pouvaient se développer entre les endiguements et ne pas être complètement envahis par la végétation, ce qui a considérablement réduit les possibilités d'échantillonnage. Les dépôts alluviaux récents ont fait l'objet d'un échantillonnage sur des bancs situés à l'aval du secteur de Louisvale en juillet 2001 (après une crue de 750 m³/s d'une période de retour de 1,2 ans survenue en décembre 2000) et juin 2002 (après deux crues de 1 785 et 1 750 m³/s survenues en décembre 2001 et en février 2002 et de peu inférieures au débit biennal). Les échantillons prélevés dans les formes issues du dépôt de suspension ont été étudiés avec la méthode de l'image CM (Passegga, 1957 ; Bravard et Peiry, 1999) ; celle-ci repose sur l'utilisation de deux paramètres, la médiane et le percentile le plus grossier, qui permettent de déterminer les processus de transport et de dépôt³. Dans ce secteur, la progression et la destruction des roseaux (*Phragmites australis* et *Arundo donax*) ont été utilisées comme indicateur des changements géomorphologiques dans le chenal principal du fleuve.

3. La morphologie de l'Orange reste très mal connue parce que l'on ne connaît pas l'âge des dépôts sédimentaires formant les îles principales, ni la profondeur du substratum sous les alluvions, sauf en de rares endroits où des drains ont été creusés. Ni le DWAF, ni la section locale du *Council for Geosciences* ne disposent de données sur ce sujet. Seules les données hydrologiques sont connues avec une bonne précision depuis les années 1930 (DWAF, 1992).

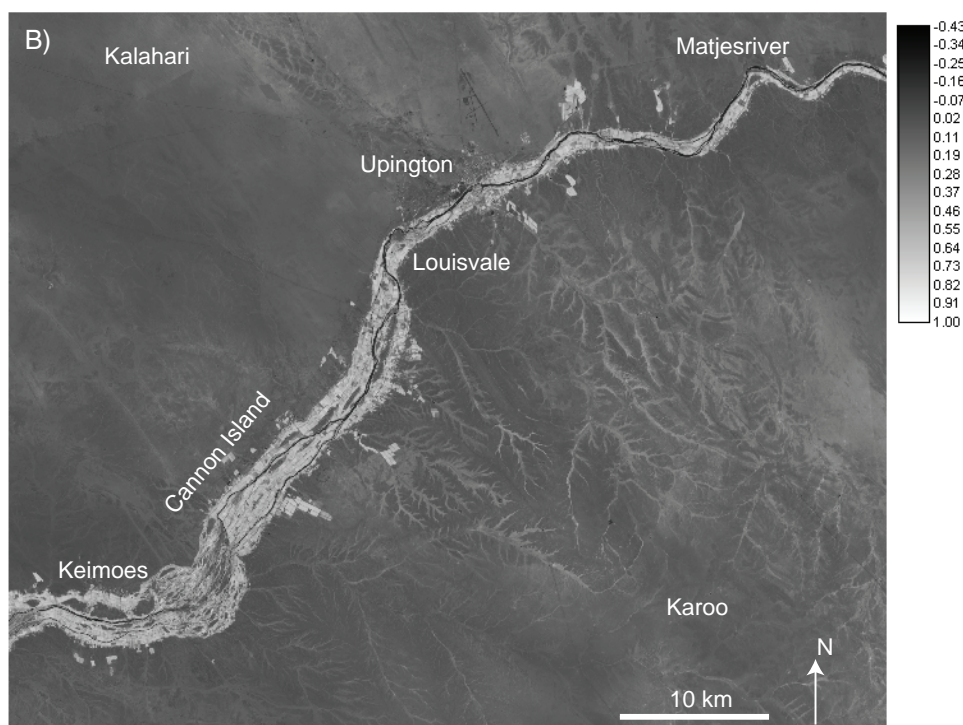
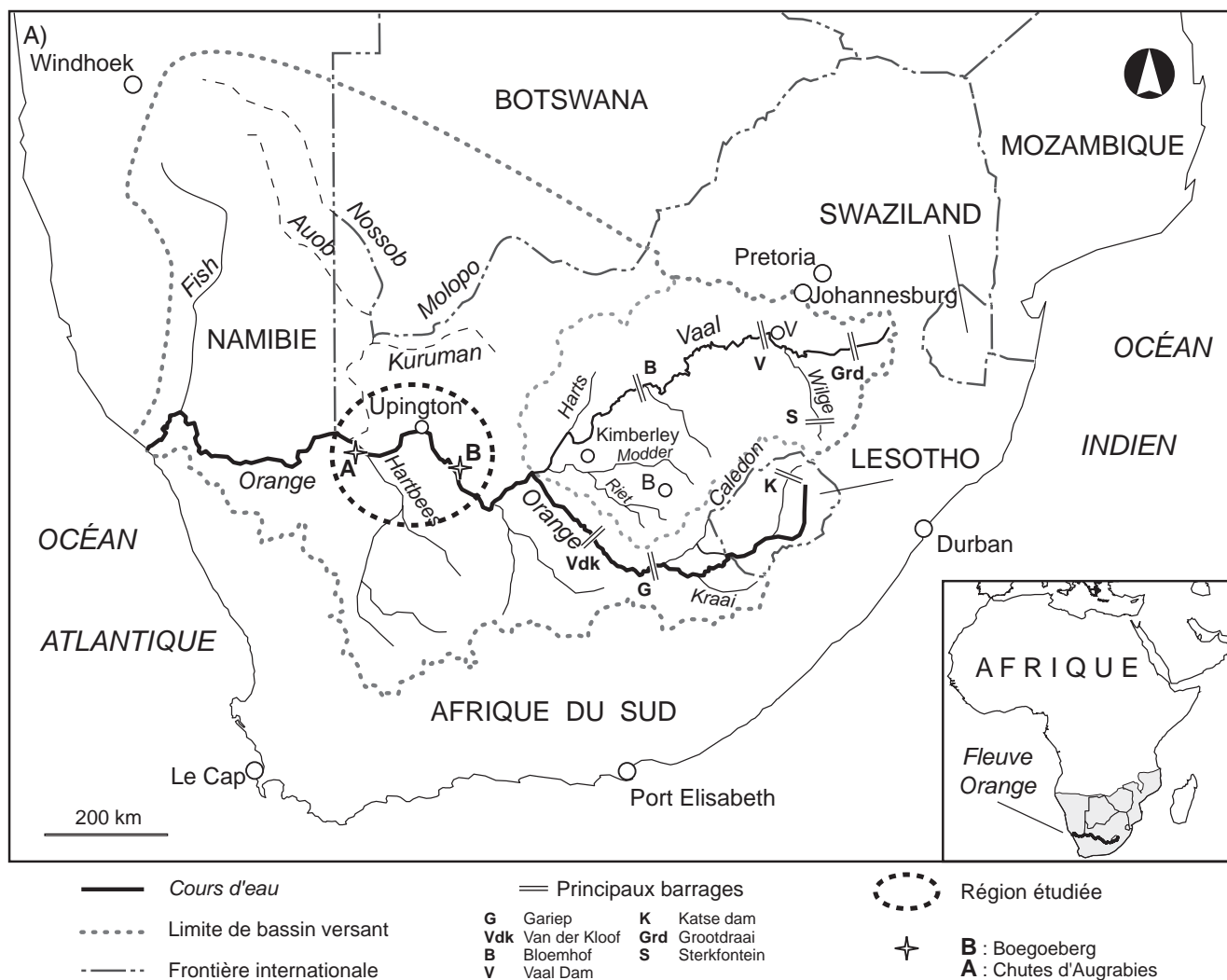


FIGURE 1. (A) Carte de localisation de l'Orange (Afrique du Sud), des grands barrages et de la région d'étude. (B) Image SPOT de la région d'Upington prise en 2002 retravaillée avec l'indice de végétation normalisé. Les terres irriguées apparaissent en gris clair, le désert dans les teintes foncées et le fleuve en noir.

(A) Location map of the Orange River (South Africa), great dams and the study region. (B) SPOT image of the Upington region taken in 2002 reworked with the standardized vegetation index. Irrigated lands appear in light gray, desert in dark hues and the river in black.

TABLEAU II

Effets directs du système de transfert sur les débits liquides et les débits solides

Types d'impact	Causes	Exemples
Diminution du débit	Évaporation sur les lacs Transferts	La perte par évapotranspiration sur les grands barrages de l'Orange est estimée à 0,700 km ³ /an (Basson, 1999) 1,5 km ³ /an sont transférés hors du bassin-versant
Altération de la variabilité annuelle	Grands barrages Transferts	En aval du barrage de Vanderkloof, la répartition été-hiver est passée d'un rapport de 82 % contre 18 % avant la construction des deux grands barrages à un rapport de 59 % contre 41 % (Benade, 1993)
Altération de la variabilité interannuelle	Barrages	De 1862 à 1949, l'Orange s'est arrêté naturellement de couler six fois à la confluence avec le Vaal. Mais depuis plus de 50 ans, ce phénomène ne s'est produit qu'une seule fois, en 1985
Altération irrégulière du débit	Production hydroélectrique	Les variations du débit à Marksdrift (à la confluence du Vaal) atteignent entre 125 et 173 m ³ /s par périodes de 12 heures, en fonction du turbinage à la centrale de Vanderkloof
Charge sédimentaire	Barrages	En 20 ans, Gariep et Vanderkloof ont retenu près de 700 millions de tonnes de sédiments. Le barrage de Welbedacht a perdu 85 % de sa capacité en 15 ans (Rooseboom et Van Vuuren, 1988)

Ces travaux demandaient au préalable une description précise de la dynamique fluviale, fondée sur le calcul des puissances spécifiques pour certains débits caractéristiques. Cela nous a permis de distinguer huit types morphologiques principaux (tabl. IV). Notre classification, réalisée à partir de l'observation des formes fluviales⁴, rejoint dans les grandes lignes les travaux de Tooth et McCarthy (2004), mais en distinguant les formes d'anastomose (de type roche en place, alluviale ou mixte) et en prenant en compte les aménagements locaux qui masquent parfois complètement les formes fluviales originelles.

RÉSULTATS STABILITÉ ET MOBILITÉ DES FORMES FLUVIALES

Le premier résultat de l'étude des photographies aériennes et des cartes anciennes est, pour l'ensemble des secteurs fonctionnels considérés, la remarquable stabilité en plan des formes fluviales entre le début du siècle et aujourd'hui, tant pour le type anastomose en lit rocheux, où la résistance de la roche en place pourrait expliquer ce phénomène, que dans les secteurs d'anastomose mixte aménagée.

Nous détaillons ici le cas du coude de Matjesriver (fig. 4), où nous avons trouvé dans les archives du DWAF une carte ancienne datée de 1925. La comparaison de cette carte avec le cadastre récent (1980) montre le comblement des chenaux secondaires qui n'étaient probablement pas en eau lors des

fortes crues et qui sont aujourd'hui isolés par une digue presque continue⁵. Mais les deux points intéressants pour notre propos sont la stabilité du seuil rocheux situé au centre du chenal et les bancs de sable situés en aval que l'on retrouve exactement à la même position. D'autres comparaisons entre les photographies aériennes du survol de 1937 et celle de 2002 montrent sur l'ensemble de la zone comprise entre Boegoeberg et Augrabies la même stabilité des formes fluviales alors qu'elles ont été déconnectées du reste du macro-chenal et que les débits liquides et solides venant de l'amont ont été modifiés par le système de transfert. La seule différence notable entre les observations actuelles et les données issues des photographies aériennes est le développement en certains endroits de roseaux (*Phragmites australis* et *Arundo donax*).

La stabilité inattendue des formes fluviales, étant donné l'ampleur des aménagements, ne signifie pourtant pas pour autant l'absence de dynamiques fluviales importantes. Cela nous a donc conduit à affiner les méthodes d'investigation en tenant compte des effets des grandes crues (période de retour de vingt ans) qui envahissent tout le macro-chenal, dont les bancs sableux et les roselières.

Ce travail a été mené sur des bancs alluviaux situés à quelques kilomètres en aval d'Upington. Comme dans le cas de Matjesriver, la superficie totale des bancs sableux en 1941 et 1994 (16,2 ha en 1941, 15,1 ha en 1994⁶) et leur position (forme en croissant, disposition en aval des rapides) est la même (fig. 5). Toutefois, une étude plus détaillée montre une

4. Les valeurs des pentes et des puissances spécifiques pour les secteurs, les ensembles et les unités fonctionnelles ont été calculées ultérieurement.

5. La comparaison avec la photographie aérienne de 2002 ne montre pas plus de changements.

6. Les superficies indiquées ont été mesurées sur les photographies aériennes à l'aide du logiciel MapInfo.

plus grande mobilité. Le facteur déterminant est le passage de grandes crues (période de retour de 20 ans, $Q_{20 \text{ ans}}$). Ainsi, après la crue de 1974, le banc a presque complètement disparu, ne couvrant plus que 6,6 ha, mais trois ans plus tard, il

est presque entièrement reconstitué. Il y a donc bien un changement radical de la morphologie fluviale lors des grandes crues et un retour rapide à l'état antérieur.

La dynamique fluviale a cependant subi une modification fondamentale depuis 1976, date à laquelle apparaissent les roseaux dans le lit fluvial, avant leur prolifération. Cette colonisation végétale est probablement due à une combinaison de facteurs incorporant la forte réduction des crues petites et moyennes, l'eutrophisation des eaux fluviales par la colature en aval des périmètres irrigués ainsi que le maintien d'un débit minimum à l'aval des barrages. Les roseaux ont pour effet d'augmenter la rugosité, de piéger les matières en suspension organiques et minérales et d'augmenter la résistance des formes lors des crues petites et moyennes.

L'image de Passega (fig. 6) montre en effet la succession de deux dynamiques : (1) la petite crue de décembre 2000 n'a déplacé que du sable et des granules par suspension graduée et roulement et des fines incorporant du limon se sont déposées dans les roselières demeurées intactes. (2) Les deux crues de l'été austral 2001-2002 ont provoqué une importante fossilisation des secteurs de roselière et de saulaie jeune par le sable ainsi que des phénomènes réduits d'afouillement dans la roselière. La suspension graduée gagne en importance dans les milieux de sédiments, au détriment des limons qui sont exportés vers l'aval.

Le bilan de trois petites crues est nettement positif sur le plan sédimentaire, la végétation riveraine contribuant à créer une rétroaction positive depuis la fin des années 1970. Même la crue de 1988 ($8\,500 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $Q_{20 \text{ ans}}$) n'a pas été capable de détruire les formes construites si l'on se réfère au tracé en plan ; il n'est pas certain qu'elle ait eu une grande efficacité pour réduire la hauteur des formes construites.

L'étude du lit de l'Orange sur une période d'environ 75 ans, dans le secteur représentatif d'Upington, a donc permis de constater que l'anastomose mixte (alluvions et substratum) est une forme stable en plan. L'énergie fluviale est utilisée pour transporter la charge, sans influence notable sur le substratum rocheux à l'échelle contemporaine. L'étude de la dynamique des petites crues montre que les processus d'accumulation prédominent entre deux grandes crues.

HYPOTHÈSES D'INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Le fonctionnement du lit actif de l'Orange nous a conduit à formuler trois hypothèses sur le fonctionnement de ce système fluvial. La première est qu'un seuil à partir duquel les changements du système dans son ensemble se manifesteront n'a pas encore été franchi. Lagasse (1994) a ainsi montré que dans le cas du Rio Grande, les métamorphoses fluviales ne se sont produites que lorsqu'un pavage de galets a été brisé. Or les grands barrages Vanderkloof et Gariep, construits il y a un peu plus de trente ans, sont situés à plus de 800 km en amont. Il est donc envisageable que le transfert de l'amont vers l'aval de la vidange du sable en situation de dépôt ne se soit pas encore réalisé⁷.

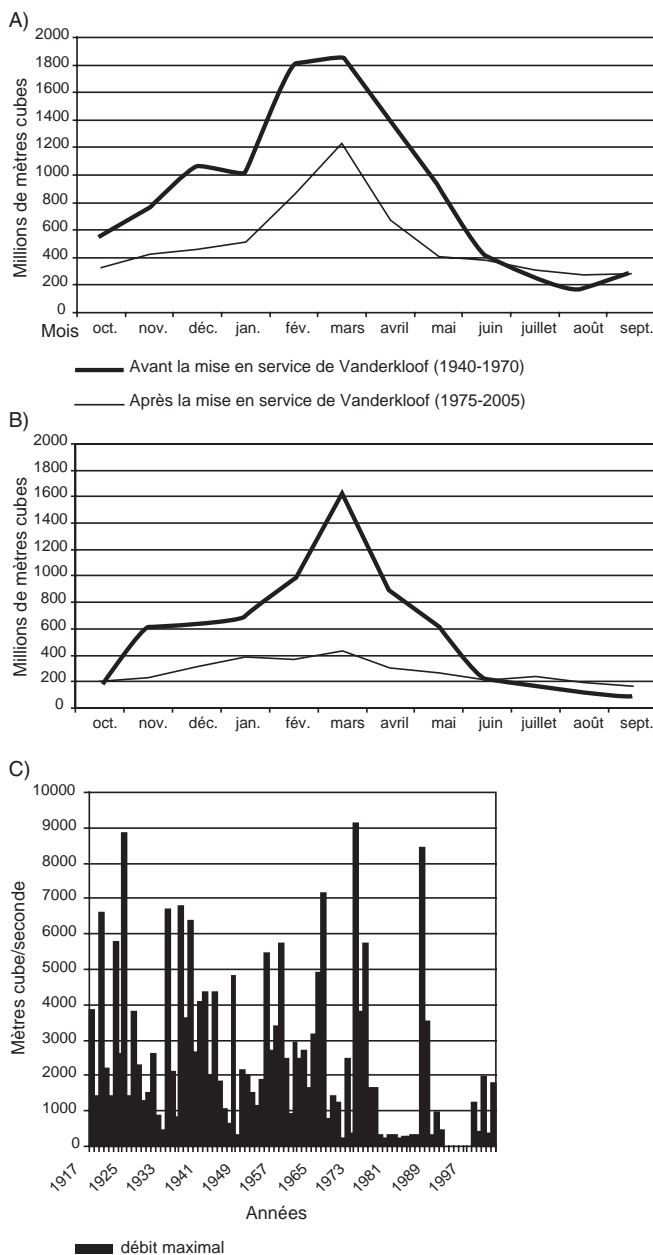


FIGURE 2. Évolution des débits depuis la mise en service du barrage de Vanderkloof. (A) Débits moyens mensuels mesurés à Upington entre 1940 et 2005. (B) Débits médians mensuels mesurés à Upington entre 1940 et 2005. (C) Débits maximums annuels mesurés à Upington entre 1917 et 2005. (source : Department of Water Affairs and Forestry, 1992).

Evolution of discharges since putting into service of the Vanderkloof dam. (A) Average monthly discharges measured at Upington between 1940 and 2005. (B) Median monthly discharges measured at Upington between 1940 and 2005. (C) Maximum annual discharges measured at Upington between 1917 and 2005. (Source : Department of Water Affairs and Forestry, 1992).

7. Le barrage Gariep (H.F. Verwoerd, capacité de stockage de $5,9 \text{ km}^3$) a été mis en service en 1971 et celui de Vanderkloof (P.K. Le Roux, capacité de stockage de $3,2 \text{ km}^3$), en 1976.

TABLEAU III

Impacts de l'utilisation de l'eau et des aménagements locaux sur les débits liquides et solides

Types d'impact	Causes	Exemples
Diminution du débit	Irrigation intensive	La consommation agricole dans le bassin de l'Orange est estimée entre 0,736 et 0,903 km ³ ; 10 à 40 % retournent en moyenne vers le fleuve (superficie irriguée : 52 000 ha) (Mackenzie et Craig, 1999). Pour le bassin du Vaal, la consommation agricole théorique est estimée à 1,15 km ³ , pour 138 000 ha. La consommation réelle est 20 % inférieure.
Variations brutales du débit	Entretien des canaux	Lors du curage des canaux, on constate des brusques lâchers d'eau très localisés, mais très perturbateurs pour l'écosystème (Palmer, 1997).
Perte de connectivité	Construction de digues	La construction de nombreuses digues pour protéger les champs irrigués dans la région d'Uppington a complètement isolé le fleuve de sa plaine d'inondation.
Diminution de la charge sédimentaire	Construction de digues	Conséquence directe du point précédent.

Il est également possible que les effets des grands aménagements soient contrebalancés par les aménagements locaux, voire qu'il existe des boucles de rétroaction négatives qui contrebalancent les perturbations anthropiques. Selon le concept de discontinuité (*Serial Discontinuity Concept*) de Stanford et Ward (1983), les rivières auraient tendance à revenir aux conditions écologiques initiales après une perturbation. La direction et l'extension des changements dépendent de la variable considérée et de l'emplacement du barrage dans le continuum fluvial, tel qu'il a été défini par Vannote en 1980. Or, comme le notent ces auteurs, les modèles prédictifs des grands barrages ne rendent compte que d'une partie des impacts attendus. Stanford et Ward (2001) ont examiné la pertinence du système au regard des recherches réalisées depuis plus de quinze ans et les variations par rapport aux impacts attendus. La principale distorsion est due au fait que, comme l'a souligné Bravard (1987 : p. 395), « la dynamique observable enregistre à la fois le fonctionnement de l'écosystème et une dérive plus ou moins rapide imputable aux perturbations ». Il existe donc « une tendance à sous-estimer que la perturbation va s'insérer dans un environnement souvent instable ». Cette instabilité peut être due à une évolution naturelle, mais aussi à la déstabilisation par d'autres ouvrages (très petits barrages, dérivations, seuils artificiels, digues, obturation des chenaux secondaires), ce qui correspond tout à fait à la région d'Uppington.

Enfin, la théorie de la catastrophe (*Catastrophe Theory*) présentée par Graf (1988) dans son étude générale sur les rivières en milieu semi-aride ouvre une troisième perspective. Cette théorie, dérivée des travaux du mathématicien R. Thom, est, comme le souligne Graf dès 1979, avant tout descriptive⁸. Mais elle permet notamment de comprendre l'existence simultanée de plusieurs formes d'équilibre dans un même système.

Ainsi, selon cet auteur (Graf, 1979 : p. 63), « s'il y a deux facteurs de contrôle (comme les forces et les résistances) et une variable de réponse (comme la largeur du chenal), alors le système va montrer deux états d'équilibre, avec un passage de l'un à l'autre qui peut être graduel ou abrupt ». Cette théorie présente plusieurs difficultés pratiques, comme la définition de facteurs de contrôle appropriés et l'obtention de mesures suffisamment précises, mais aussi théoriques. La théorie est descriptive et non explicative, *a fortiori* prédictive. Elle suppose que tous les systèmes fluviaux tendent vers un état et atteignent, au moins pendant une brève période de temps, un état d'équilibre. Or, comme le souligne Graf, il est possible qu'au moins certaines rivières ne répondent pas à cette tendance dans les déserts et sur leur marge. Dans le contexte de l'Orange, notre objectif n'est pas ici de valider ou non cette théorie, mais plutôt de voir en quoi cette perspective peut aider à comprendre les évolutions constatées sur le terrain. Nous avons ainsi vu que dans le cas de Louisvale la morphologie fluviale correspond à deux types de fonctionnement, l'un pour les basses eaux (essentiellement la disposition des bancs de sable), l'autre pour les fortes crues (le substrat rocheux). L'existence simultanée de ces deux positions d'équilibre explique pourquoi la résilience est si importante dans le cas de l'Orange et pourquoi la stabilité sur le temps long peut masquer des fortes dynamiques sur le temps court.

Il est pour le moment impossible de trancher définitivement entre ces différentes hypothèses, de nombreuses questions restant en suspens. Il n'existe aucune donnée sur l'importance des stocks sédimentaires entre les grands barrages et Boegoeberg. Il est possible que leur épuisement induise à terme de profondes modifications de la morphologie fluviale. On ne sait également que peu de choses sur le rôle des affluents locaux qui lors de leur rares courtes et fortes crues

8. Pour R. Thom, le terme catastrophe est uniquement descriptif de figures géométriques particulières et ne se réfère aucunement à des événements particuliers.



Local installations of the Orange River — Renosterkop Island sector. This aerial photograph taken in 1937 shows the development process of Renosterkop Island. The main dyke and the channels are already built and the upstream, cultivated. Downstream from the road, the secondary channels are easily distinguishable with their typical braided morphology (#1). In north, a broad flat-bottomed channel (#2) appears in stereoscopic vision. Upstream, this one is in course of flattening for its setting in culture (#3). The downstream part of Renosterkop Island is totally denuded of vegetation but it is impossible to know if it is the natural state (resulting from the great flood of 1934) or a cleaning related to flattening. (Source : Reproduced with the permission of the Chief Directorate Surveys and Mapping, flight line 15741, photograph 54628, 1937).

FIGURE 3. Aménagements locaux de l'Orange — secteur de l'île Renosterkop. Cette photographie aérienne prise en 1937 montre le processus de mise en valeur de l'île Renosterkop. La digue principale et les canaux sont déjà construits et la partie amont est déjà cultivée. En aval de la route, les chenaux secondaires sont aisément distinguables avec leur morphologie en anastomose typique (#1). Au nord, un large chenal à fond plat (#2) apparaît en vision stéréoscopique. Plus en amont, celui-ci est en cours d'aplanissement pour sa mise en culture (#3). La partie aval de l'île de Renosterkop est totalement dépourvue de végétation, mais il est impossible de savoir s'il s'agit de l'état naturel (résultant de la grande crue de 1934) ou d'un défrichement lié à l'aplanissement. (source : reproduit avec la permission du Chief Directorate Surveys and Mapping, ligne de vol 15741, photographie 54628, 1937).

TABLEAU IV
Classification des secteurs fonctionnels de l'Orange entre Boegoeberg et Augrabies

Type	Pente (m/km)	Puissance spécifique pour Q_{20}	Caractéristiques du macro-chenal	Sous type	Caractéristiques des chenaux	Puissance spécifique (Q_5)	Degré d'artificialisation	Désignation	Exemple
A	>1	>120 W/m ²	<ul style="list-style-type: none"> – Largeur deux à trois fois plus importante que la largeur moyenne – La plupart des chenaux secondaires sont peu actifs – Peu de dépôts sédimentaires, malgré la présence de quelques îles sableuses dans les zones protégées 	A1	<ul style="list-style-type: none"> – Petit nombre de chenaux – Pas de dépôts sédimentaires 	350 W/m ²	Nul	Seuil rocheux	Neusberg
				A2	<ul style="list-style-type: none"> – Nombreux chenaux à pente forte, souvent sinueux – Exploitent les zones de faiblesse du lit rocheux et contournent les zones résistantes – Présence de rapides, de petites chutes et de moulles – Canyons 	250-350 W/m ²	Faible	Anastomose en lit rocheux	Keimoes Friersdale
B	0,7-1	70-120 W/m ²	<ul style="list-style-type: none"> – Grande diversité de formes, avec dépôts latéraux, rapides en lit rocheux, etc. 	B1		100 W/m ²		Seuil et moulle non aménagé	Aval de Boegoeberg
				B2	<ul style="list-style-type: none"> – Mise en culture de bancs latéraux protégés par des digues – Invasion des rapides par les roseaux 	>100 W/m ²	Fort	Seuil et moulle aménagé	Gifkloof Louisvale
C	0,7-1	<40 W/m ²	<ul style="list-style-type: none"> – Largeur importante – Rectiligne ou peu sinueux – Grande diversité de formes, avec pointements du lit rocheux et îles sédimentaires – Dépôts sédimentaires latéraux nombreux 	C1				Anastomose mixte	Cas inexistant
				C2	<ul style="list-style-type: none"> – Nombreux chenaux comblés ou réutilisés – Endiguement généralisé des chenaux principaux – Seuils artificiels – Présence de bancs de sable dans le chenal principal 	Fortes variations (notamment à cause des seuils artificiels)	Total	Anastomose mixte aménagée	Cannon Island Renosterkop Island
D	<0,4	10-50 W/m ²	<ul style="list-style-type: none"> – Faible largeur – Sinuosité parfois marquée – Bancs latéraux – Absence de pointements rocheux – Parfois une île « longiligne » 	D1	<ul style="list-style-type: none"> – Chenal principal quasi-rectiligne – Quelques chenaux secondaires parallèles au chenal principal – Dépôts latéraux 	30-60 W/m ²	Peu aménagé	Chenal unique	Cas rare
				D2	<ul style="list-style-type: none"> – Chenal principal quasi-rectiligne complètement endigué – Mise en culture des bancs latéraux 	40-100 W/m ²	Quasi-total	Chenal unique aménagé	Majeure partie du cours supérieur

Note : Pour tous les secteurs fonctionnels, la charge de fond (et le fond du lit) est caillouteuse.

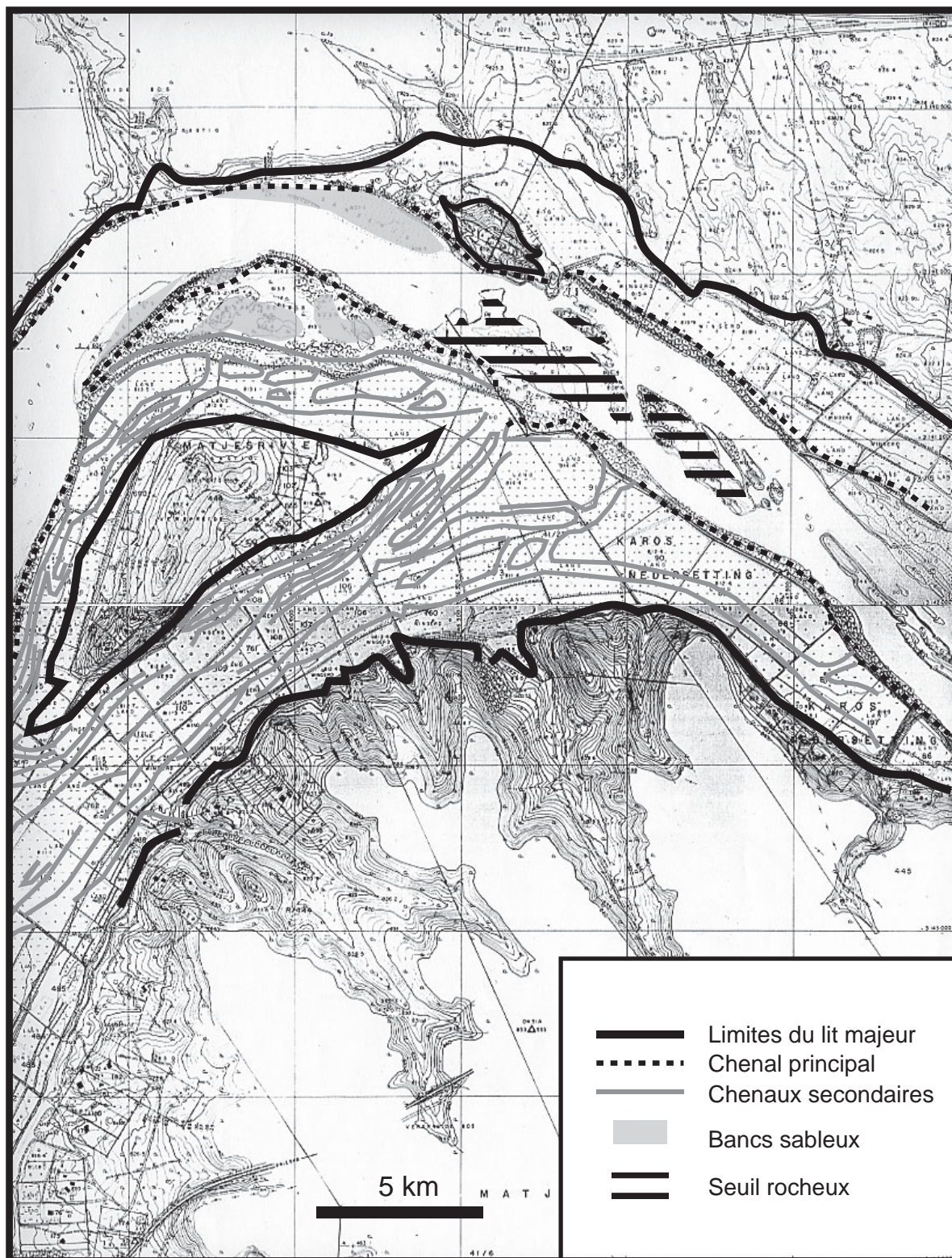


FIGURE 4. Aménagements locaux de l'Oranger — secteur de Majestriver. Les éléments extraits de la carte des services de l'irrigation dressée en 1925 ont été superposés sur le cadastre de 1980 à l'aide du logiciel MapInfo. Malgré le comblement de tous les chenaux secondaires qui séparaient l'île principale de la rive gauche, on reconnaît encore dans le chenal principal les bancs sableux en rive droite et le seuil rocheux obstruant le fleuve en amont de l'île.

Local installations of the Orange River — Majestriver sector. Elements from the services of irrigation map dressed up in 1925 were superimposed on the land register of 1980 using the MapInfo software. In spite of the filling of all secondary channels which separated the main island from the left shore, one still recognizes, in the main channel, the sandy banks on the right shore and the rocky threshold blocking the river upstream the island.

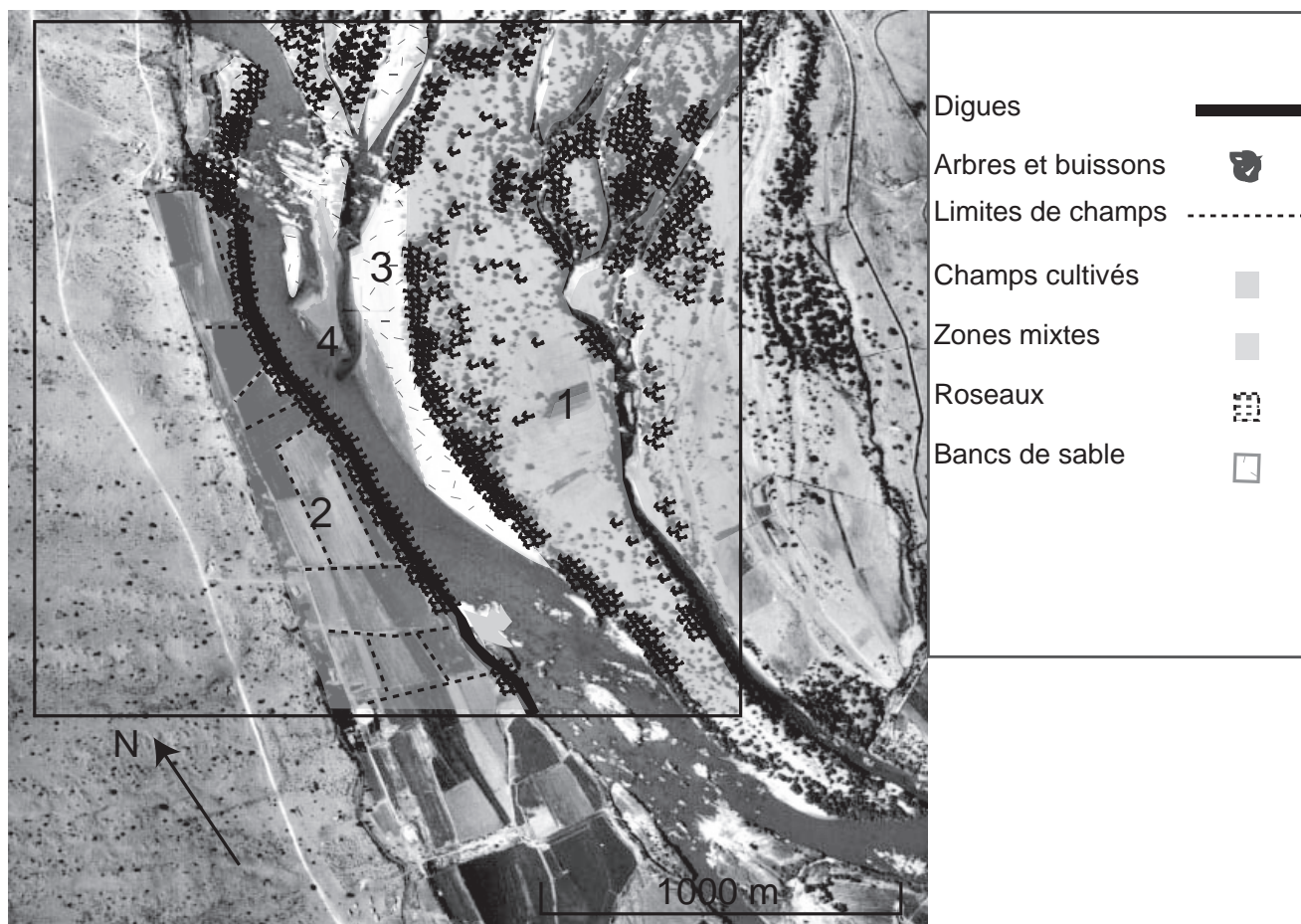


FIGURE 5A. Bancs sableux de l'Orange en 1941 — secteur de Louisvale. Sur cette photographie aérienne prise en 1941, seul un champ est cultivé en rive gauche (#1) tandis que la rive droite est déjà entièrement protégée par une digues et mise en culture (#2). Les bancs sableux (#3) apparaissent libres de végétation et ils sont bordés par des dépôts vaseux apparemment mobiles (#4). (source : reproduit avec la permission du *Chief Directorate Surveys and Mapping*, ligne de vol 15741, photographie 53251, 1941).

Sandy banks of the Orange River in 1941 — Louisvale sector. On this aerial photograph taken in 1941, only one field is cultivated on the left shore (#1) whereas the right shore is entirely protected by a dyke and put in culture (#2). The sandy banks (#3) appear free of vegetation and are bordered by apparently mobile muddy deposits (#4). (Source : reproduced with the permission of the Chief Directorate Surveys and Mapping, flight lane 15741, photograph 53251, 1941).

(la Hartebees) déversent une forte charge sédimentaire dans le macro-chenal de l'Orange, charge que ce dernier ne serait pas capable de mobiliser. Enfin, cela fait 18 ans qu'il n'y a pas eu de grande crue ($Q_{20\text{ ans}}$). Un événement de cette ampleur pourrait révéler des changements sous-jacents.

CONCLUSION

Les résultats de cette recherche suggèrent que les notions de stabilité, d'équilibre et les changements de la géomorphologie fluviale ne peuvent être interprétés directement à travers l'étude simple d'une comparaison directe entre un avant et après qui serait la construction des grands barrages. L'absence d'une métamorphose fluviale spectaculaire ne permet d'induire une absence d'impacts des divers aménagements hydrauliques.

L'installation récente de la végétation sur les marges du lit mineur pourrait créer une situation nouvelle favorable à la capitalisation des sédiments fins et, à court et moyen terme, à une métamorphose de la bande active au profit d'un chenal plus étroit. À plus long terme, les crues pourraient évacuer les sédiments fins vers l'aval et exhumer les formes en roche dure (l'Orange devenant alors une véritable rivière à lit rocheux), sans que l'on sache quelle sera la durée de vie des barrages ni la dynamique à long terme des apports provenant des affluents. Seule la prise en compte des dimensions spatiales et temporelles des formes fluviales peut permettre de comprendre et interpréter la stabilité apparente des formes fluviales de l'Orange.

L'Orange est donc un type de rivière aride particulièrement complexe. Le caractère imprévisible de sa dynamique est lié

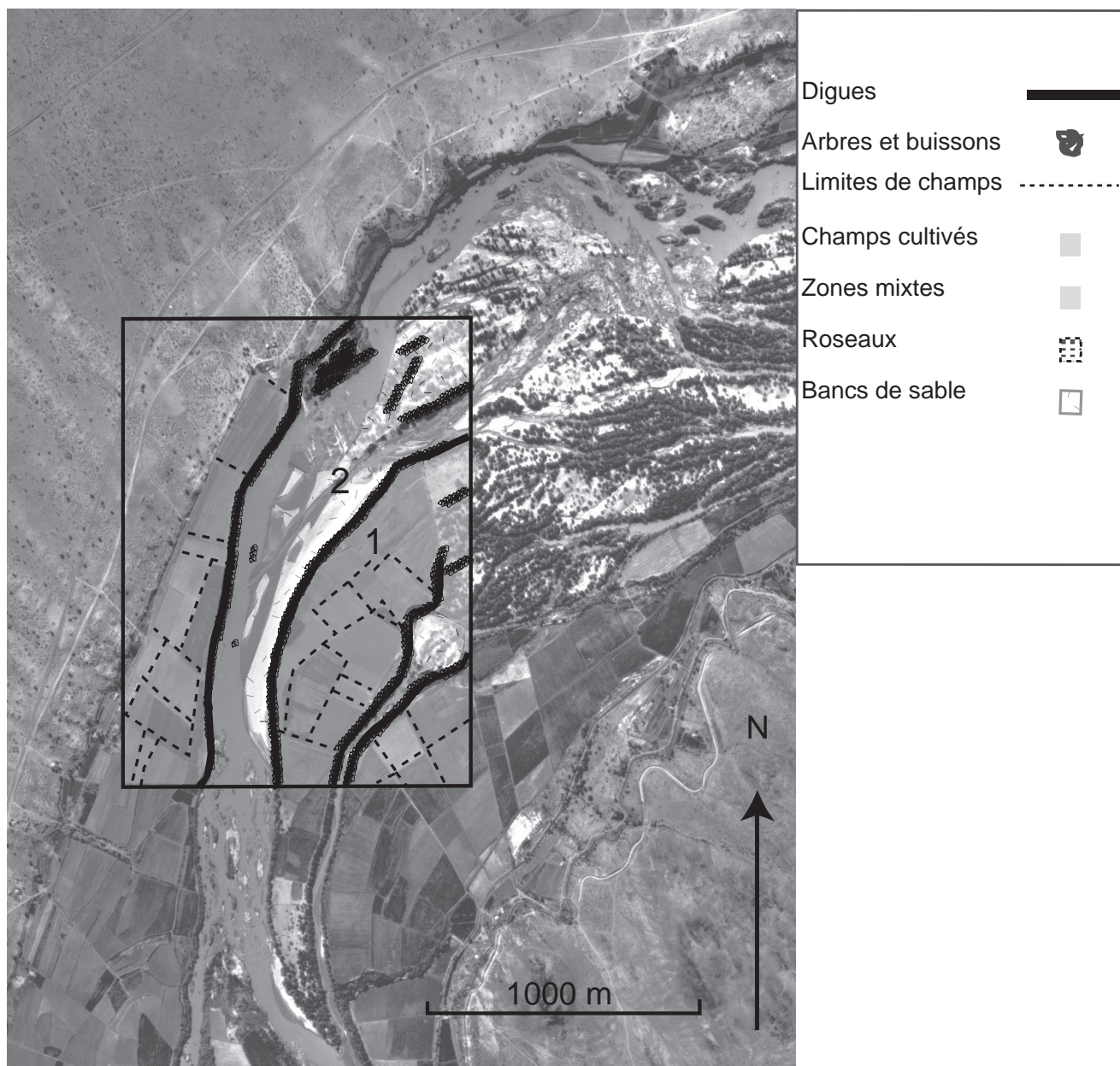


FIGURE 5B. Bancs sableux de l'Orange en 1963 — secteur de Louisviale. Vingt ans plus tard (en 1963), la rive gauche a été protégée par une digue et mise en culture (#1) dans sa partie aval. L'apparence des bancs de sable (#2) n'a pas beaucoup changé: ils sont toujours libres de végétation (et de roseaux). La mise en valeur agricole de ce secteur ne semble pas avoir affecté, du moins immédiatement, le chenal d'étiage. (source: reproduit avec la permission du Chief Directorate Surveys and Mapping, ligne de vol 487, photographie 4157, 1963).

Sandy banks of the Orange River in 1963 — Louisviale sector. Twenty years later (in 1963), the left shore have been protected by a dyke and put in culture (#1) in its downstream part. The appearance of sandy banks did not change much: they are still free of vegetation (and reeds). The agricultural development does not seem to have affected, at least immediately, the low flow channel. (Source: reproduced with the permission of the Chief Directorate Surveys and Mapping, flight lane 487, photograph 4157, 1963).

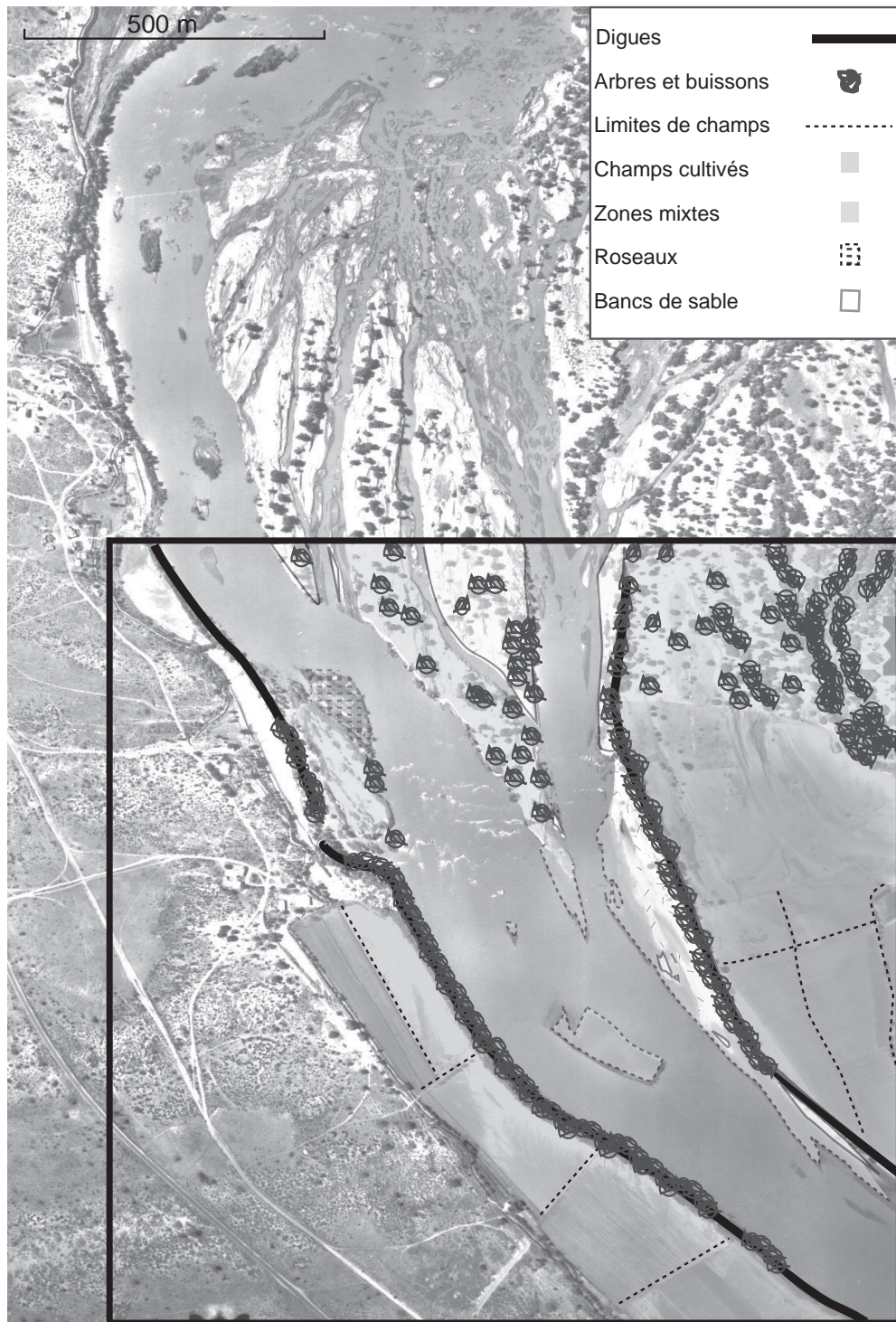


FIGURE 5C. Bacs sableux de l'Orange en 1974 — secteur de Louisvale. Après la grande crue de 1974, les bacs sableux et les roseaux ont été balayés et remplacés par des bacs vaseux. Le lessivage a également touché les zones de rapides en amont. En effet, les digues n'ont pas protégé les zones cultivées, où l'on aperçoit d'une part les épandages sableux en zones surélevées et d'autre part, le creusement des anciens chenaux de crue. Cette photographie aérienne illustre parfaitement le rôle de *reset button* des grandes crues dans les hydrosystèmes caractérisés par la variabilité. (source : reproduit avec la permission du *Chief Directorate Surveys and Mapping*, ligne de vol W143, photographie 187, 1974).

Sandy banks of the Orange River in 1974 — Louisvale sector. After the great flood of 1974, sandy banks and reeds have been swept and replaced by muddy banks. Scrubbing also affected zones of rapids upstream. Indeed, the dykes did not protect the cultivated zones, where one sees sandy spreading on high zones and the digging of old flood channels. This aerial photograph illustrate perfectly the concept of reset button of great flood into hydro-systems characterized by variability. (Source : reproduced with the permission of the Chief Directorate Surveys and Mapping, flight line W143, photograph 187, 1974).

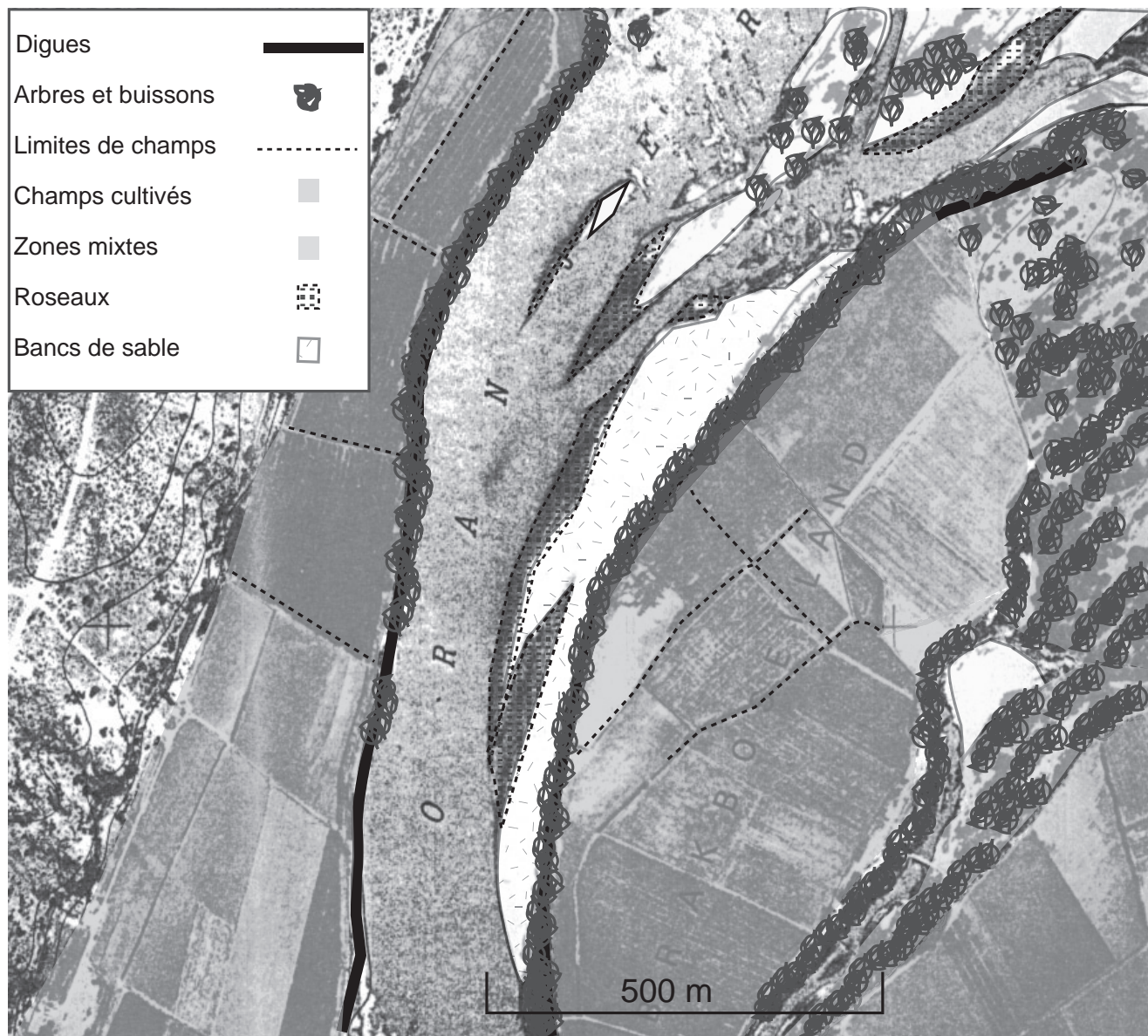


FIGURE 5D. Bancs sableux de l'Orange en 1977 — secteur de Louisvale. Après les grandes crues de 1974 et 1976, les bancs sableux se localisent presque exactement au même endroit et avec la même forme. Ce constat montre clairement l'importance du contrôle par la roche en place, et notamment du seuil rocheux situé en amont : à cause de l'importance de ce contrôle, la résilience du fleuve est extrêmement forte, du moins après les crues de cette magnitude. Les deux rives ont rapidement été remises en état. Il semble que des roseaux poussent sur le rebord du chenal principal, mais la qualité de la photographie aérienne ne nous permet pas de le confirmer. (source : *Department of Water Affairs and Forestry*, 1977).

*Sandy banks of the Orange River in 1977 — Louisvale sector. After the great floods of 1974 and 1976, the sandy banks are located almost exactly at the same place, with the same shape. This statement clearly shows the importance of the control by the bedrock, and in particular the rocky threshold located upstream: because of the importance of this control, the resilience of the river is extremely strong, at least after floods of this magnitude. The two shores were quickly given in state. It seems that reeds grow on the edge of the main channel, but the quality of the aerial photograph does not allow us to confirm it. (Source : *Department of Water Affairs and Forestry*, 1977).*

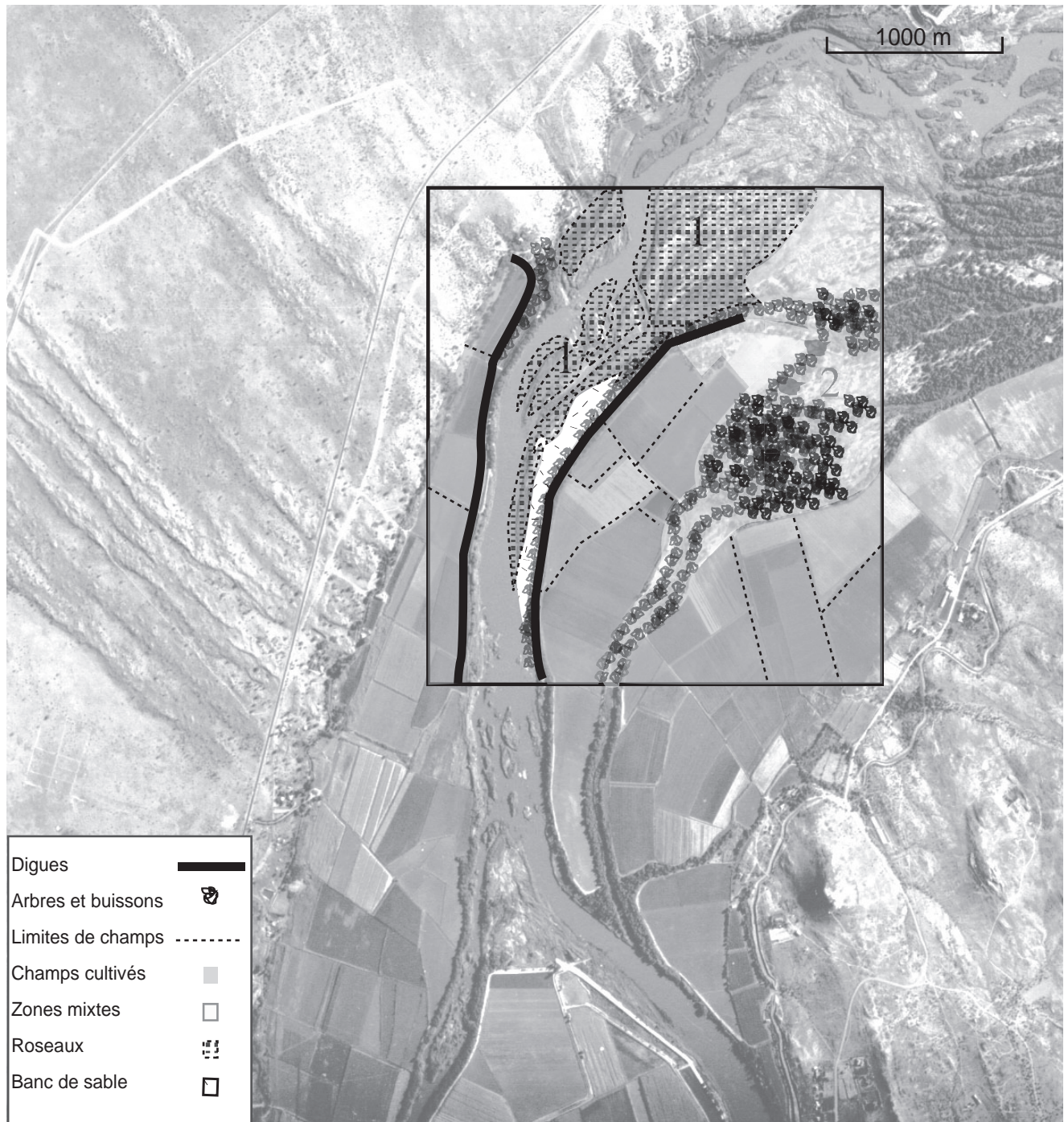


FIGURE 5E. Bancs sableux de l'Orange en 1994 — secteur de Louisvale. Vingt ans après la mise en eau du barrage Gariep et la régularisation du débit, le changement majeur du paysage fluvial est sans aucun doute la croissance des roseaux (#1). Ces derniers occupent un espace beaucoup plus important: ils ont envahi une grande partie des rapides et colonisent le rebord extérieur des bancs sableux. On remarque également que la végétation semble plus dense dans les zones amont non cultivées (#2). (source: reproduit avec la permission du *Chief Directorate Surveys and Mapping*, ligne de vol 971, photographie 219, 1994).

Sandy banks of the Orange River in 1994 — Louisvale sector. Twenty years after the setting in water of the Gariep dam and the regularization of discharge, the major change of the river landscape is without any doubt the growth of reeds. These occupy a space much more important: they have invaded a great part of the rapids and colonize the external edge of the sandy banks. It is also noticed that vegetation seems to be denser in non-cultivated upstream zones. (Source: reproduced with the permission of the Chief Directorate Surveys and Mapping, flight line 971, photograph 219, 1994).

- Mackenzie, R.S. et Craig, A.R., 1999. Evaporation losses from south african rivers. South African Water Research Commission, Pretoria, WRC Report 638/1/99.
- Passega, R., 1957. Texture as characteristic of clastic deposition. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 41 : 1954-1984.
- Palmer, R.W., 1997. Principles of integrated control of blackflies in South Africa. South African Water Research Commission, Pretoria, WRC Report 650/1/97.
- Petts, G.E., 1984. Impounded Rivers: Perspectives for Ecological Management. John Wiley and Sons, Chichester, 326 p.
- Poff, N.L. et Ward, J.V., 1992. Physical habitat template of lotic systems: recovery in the context of historical pattern of spatiotemporal heterogeneity. Environmental Management, 14 : 629-645.
- Rooseboom, A. et Van Vuuren, S.J., 1988. Regime changes in the Caledon River associated with sediment deposition upstream of Welbedacht barrage, p. 365-369. *In* W.R. White, édit., International Conference on River Regime. John Wiley and Sons, Chichester, 456 p.
- Springer, G.S., Tooth, S. et Whol, E.E., 2006. Theoretical modeling of stream potholes based upon empirical observations of the Orange River, Republic of South Africa. Geomorphology, 82 : 160-176.
- Standford, J.V. et Ward, J.A., 1983. The serial discontinuity concept of lotic ecosystem, p. 29-42. *In* T.D. Fontaine III et S.M. Bartell, édit., Dynamics of Lotic Ecosystems. Ann Arbor Science, Ann Arbor, 494 p.
- Standford J.V. et Ward, J.A., 2001. Revisiting the serial discontinuity concept. Regulated Rivers, 17 : 303-310.
- Thoms, M.C. et Walker, K.F., 1991. Channels changes related to low level weirs, p. 235-249. *In* P.A. Carling et G.E. Petts, édit., Lowlands Floodplains Rivers: Geomorphological Perspectives, John Wiley and Sons, Chichester, 302 p.
- Tinkler, K. et Whol, E., édit., 1998. Rivers over Rock. Fluvial Processes in Bedrock Channels. American Geophysical Union, Washington D.C., Geophysical Monographs Series 107, 323 p.
- Tooth, S. et MacCarthy, T., 2004. Anabranching in mixed bedrock alluvial rivers: the example of the Orange River above Augrabies Falls, Northern Cape Province, South Africa. Geomorphology, 57 : 235-262.
- Tricart, J., 1956. Types de fleuves et systèmes morphogénétiques en Afrique occidentale, p. 303-345. Com. Travaux Hist. et Sc., Section de géographie.
- UNEP, 1995. Global Environment Monitoring System: Water Quality of World River Basin. Nairobi, Unep Environmental Library no 14, 40 p.
- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R. et Cushing, C.E., 1980. The river continuum concept. Canadian Journal of Aquatic Sciences, 37 : 130-137.
- Walker, K.F., 1992. A semi-arid lowland river: River Murray, South Australia, p. 472-492. *In* P.A. Calow et P.E. Petts, édit., The Rivers Handbook, vol. 1. Blackwell Scientific, Oxford.
- Whol, E., 1998. Bedrock channel morphology in relation to erosional processes, p. 133-151. *In* K. Tinkler et E. Whol, édit., Rivers over Rock. Fluvial Processes in Bedrock Channels. American Geophysical Union, Washington D.C., Geophysical Monographs Series 107, 323 p.
- Zawada, P.K., 1997. Palaeoflood hydrology: method and application in flood-prone Southern Africa. South African Journal of Science, 93 : 131-132.